



Multicore fiber

Sasaki, Yusuke; Takenaga, Katsuhiro; Saitoh, Kunimasa; Morioka, Toshio

Publication date:
2017

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Sasaki, Y., Takenaga, K., Saitoh, K., & Morioka, T. (2017). Multicore fiber. (Patent No. WO2017159385).

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2017年9月21日(21.09.2017)



(10) 国際公開番号
WO 2017/159385 A1

- (51) 国際特許分類:
G02B 6/02 (2006.01) **G02B 6/036** (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2017/008307
- (22) 国際出願日: 2017年3月2日(02.03.2017)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2016-054378 2016年3月17日(17.03.2016) JP
- (71) 出願人: 株式会社フジクラ(FUJIKURA LTD.)
[JP/JP]; 〒1358512 東京都江東区木場一丁目5番
1号 Tokyo (JP). 国立大学法人北海道大学(NATIONAL
UNIVERSITY CORPORATION
HOKKAIDO UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒0600808 北海道
札幌市北区北8条西5丁目 Hokkaido (JP). テク
ニカル・ユニヴァーシティ・オブ・デンマーク
(TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK)
[DK/DK]; 2800 コンゲン
ス・リユンビュー、アンケル・エンゲルンド
ヴァイ、1、ビルディング・101エイ Kgs. Lyngby (DK).
- (72) 発明者: 佐々木 雄佑(SASAKI Yusuke); 〒2858550
千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジ
クラ佐倉事業所内 Chiba (JP). 竹永 勝宏

(TAKENAGA Katsuhiko); 〒2858550 千葉県佐倉市
六崎1440番地 株式会社フジクラ佐倉事業
所内 Chiba (JP). 齊藤 晋聖(SAITOH Kunimasa);
〒0600808 北海道札幌市北区北8条西5丁目
国立大学法人北海道大学内 Hokkaido (JP). 盛岡
敏夫(MORIOKA Toshio); 2800 コンゲン
ス・リユンビュー、アンケル・エンゲルンド
ヴァイ、1、ビルディング・101エイ Kgs.
Lyngby (DK).

(74) 代理人: 森村靖男, 外(MORIMURA Yasuo et al.);
〒1010032 東京都千代田区岩本町三丁目10番
9号 秋葉原花岡ビル6階 Tokyo (JP).

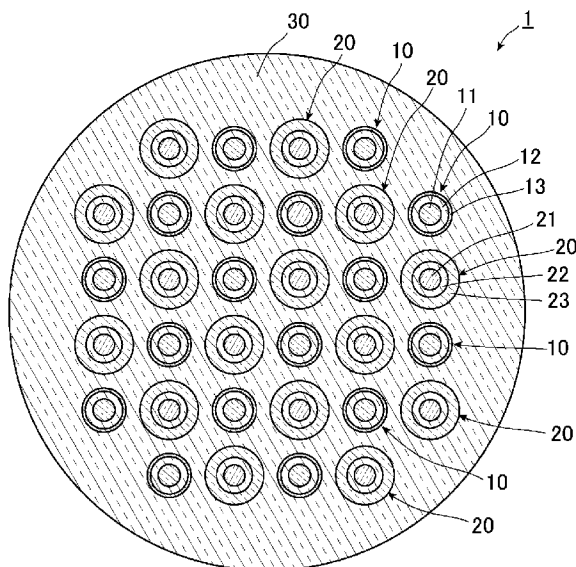
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA,
BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN,
CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG,
ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL,
IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA,
LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN,
MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE,
PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE,
SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT,
TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保
護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW,

[続葉有]

(54) Title: MULTICORE FIBER

(54) 発明の名称: マルチコアファイバ



はその余計な高次モードの光が十分減衰される。

(57) Abstract: Provided is a multicore fiber containing a plurality of cores, wherein when the multicore fiber is bent to form a curve with a diameter of 280 mm, the optical propagation loss in a mode one order higher than an optical mode used for information transmission in the optical wavelength band used for the information transmission is set between 1 dB/m and 0.02 dB/m inclusive. Thus, unnecessary light in a higher order mode can be sufficiently attenuated within propagation of 1 km. Thereby, even if unnecessary light is created in a higher order mode at a contact point between fibers, the unnecessary light in the higher order mode can be sufficiently attenuated before the next contact point.

(57) 要約: 複数のコアを備えるマルチコアファイバであって、直径280mmの曲げが加えられるときに、情報の伝送に用いられる光の波長帯における当該情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が1dB/m以下0.02dB/m以上とされ、余計な高次モードの光が1km伝搬したときに十分減衰されることにより、ファイバ同士の接続点で余計な高次モードの光が生じたとしても、次の接続点までに



MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユー
ラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨー
ロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,
ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV,
MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称： マルチコアファイバ

技術分野

[0001] 本発明は長距離通信用マルチコアファイバに関し、コアの高密度化に好適なものである。

背景技術

[0002] 一般に普及している光ファイバ通信システムに用いられる光ファイバは、1本のコアの外周面がクラッドにより囲まれた構造をしており、このコア内を光信号が伝搬することで情報が伝送される。

[0003] 近年、光ファイバ通信システムの普及に伴い、伝送される情報量が飛躍的に増大している。こうした光ファイバ通信システムの伝送容量増大を実現するためのものとして、複数のコアの外周面が1つのクラッドにより囲まれたマルチコアファイバが知られている。マルチコアファイバによれば、複数のコアを伝搬するそれぞれの光によって信号を伝送させることができるので、1つの光ファイバによって伝送できる情報量を増大させることができる。このようなマルチコアファイバは、例えば下記特許文献1に開示されている。

[0004] 下記特許文献1にも記載されているように、マルチコアファイバでは、互いに隣り合うコアを伝搬する光の一部同士が重なり、コア間クロストークが生じる場合がある。コア間クロストークを抑制する方法として、例えば、互いに隣り合うコアの間隔を大きくすることが考えられる。コア間クロストークは互いに隣り合うコアを伝搬する光同士の重なり積分で決まるため、コア間距離を大きくしてこの重なりを小さくすることにより、コア間クロストークが抑制される。また、コアやクラッドより屈折率が低いガラスや空孔によって形成される低屈折率層によってコアが囲まれることによっても、コア間クロストークを抑制することができる。コアが低屈折率層によって囲われることにより、コアを伝搬する光の径方向への広がりを小さくすることができるため、互いに隣り合うコアを伝搬する光同士の重なりが小さくなり、コ

ア間クロストークが抑制される。

[0005] 特許文献1：特開2012-211964号公報

発明の概要

[0006] しかし、マルチコアファイバにおいてコア間距離を大きくすると、ファイバ径を一定とする場合に1つのマルチコアファイバに備えられるコアの数を少なくしなければならなくなり、伝送できる情報量が少なくなる。また、コアを低屈折率層（トレンチ）で囲う場合は、コア間距離が小さくなると、複数のトレンチ付コア（トレンチで囲まれるコア）に囲まれた内側コアのカットオフ波長が長波長化することが知られている。カットオフ波長が過度に長波長化すると、余計な高次モードの光が伝搬しやすくなる。余計な高次モードの光が伝搬すると、その高次モードの光によるクロストークが生じたり、多光路干渉（MPI：Multi-Path Interference）が生じたりする可能性がある。従って、カットオフ波長の長波長化は所定の範囲に抑制されることが好ましく、カットオフ波長の長波長化を抑制するという観点からは、コア間距離を大きくすることが好ましい。しかし、コア間距離を大きくすれば上記のように1つのマルチコアファイバによって伝送できる情報量が少なくなる。

[0007] このように、従来のマルチコアファイバでは、カットオフ波長の長波長化の抑制およびコア間クロストークを抑制するために伝送できる情報量が少なくなる場合があった。

[0008] ところで、現在製品として売られている光ファイバは、2mファイバカットオフ波長や22mケーブルカットオフ波長によってカットオフ波長が規定されている。すなわち、従来のマルチコアファイバは、製品として売られている光ファイバと同様に、2mや22m伝搬した時点でのカットオフ波長が所定の値となるようにコア間距離等が設計されている。

[0009] しかし、メトロネットワーク、基幹系ネットワークのような長距離通信を行う場合は、短くても1km程度の長さの光ファイバが用いられる。長距離通信を行う場合、光ファイバは1kmから数千kmの長さで敷設されるが、

これを1つの光ファイバで実現することは困難である。そのため、短くても1 k m程度の間隔で複数の光ファイバが接続される。ここで、本発明者らは、長距離通信に好適なマルチコアファイバとするためには、光が1 k m伝搬した時点におけるカットオフ波長が所定の値となるようすれば十分であることを見出した。そこで、本発明は、長距離通信に好適なマルチコアファイバを提供することを目的とする。

[0010] かかる課題を解決するため本発明のマルチコアファイバは、直径280 mmの曲げが加えられるとき、情報の伝送に用いられる光の波長帯における前記情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が1 dB/m以下0.02 dB/m以上であるコアを少なくとも1つ備えることを特徴とするものである。

[0011] 上記マルチコアファイバでは、情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光、すなわち余計な高次モードの光の伝搬損失が0.02 dB/m以上である。これにより、上記マルチコアファイバでは、余計な高次モードの光はコアを1 k m伝搬したときに十分減衰される。上記の様に、長距離通信を行う場合、通常は短くても1 k m程度の間隔で複数の光ファイバが接続される。伝送される信号の品質の悪化やクロストークの要因となる高次モードの光は、光ファイバ同士または光ファイバと入出力デバイスや増幅器等の各種デバイスとの接続点での軸ずれによって発生することが知られている。従って、余計な高次モードの光が1 k m伝搬したときに十分減衰されることにより、接続点で余計な高次モードの光が生じたとしても、次の接続点までにはその余計な高次モードの光は十分減衰される。よって、マルチコアファイバが複数接続されて構成される伝送路全体では、高次モードの光の累積が抑制される。従って、上記マルチコアファイバは、1 k m以上の長さのマルチコアファイバに好適であり、長距離通信に好適である。

[0012] ところで、従来のマルチコアファイバでは、上記のように2 mファイバカットオフ波長や22 mケーブルカットオフ波長を基準としてコア間距離などが設計されている。しかし、上記マルチコアファイバでは、余計な高次モー

ドの光の伝搬損失が1 dB/m以下であることから、余計な高次モードの光が2 mや22 m伝搬した時点では十分に減衰されていない場合がある。上記マルチコアファイバでは、22 mケーブルカットオフ波長が情報の伝送に用いられる光の波長帯以上になっていても、光が1 km伝搬した後のカットオフ波長（1 kmカットオフ波長）は情報の伝送に用いられる光の波長帯以下になる。このように、上記マルチコアファイバでは、従来のマルチコアファイバよりもカットオフ波長が長波長化することがある程度許容される。そのため、上記マルチコアファイバでは、コアのクラッドに対する比屈折率差を大きくする等してコア間クロストークを抑制することが可能であり、コア間クロストークを抑制しつつ従来のマルチコアファイバよりもコア間距離を小さくすることができる。すなわち、上記マルチコアファイバでは、ファイバ径を一定とする場合に1つのマルチコアファイバに備えられるコア数を減らすことなくコア間クロストークを抑制できる。または、クロストーク量を一定とする場合に1つのマルチコアファイバに備えられるコア数を減らすことなくコア間距離を小さくでき、外側クラッド厚も小さくでき、ファイバ径も小さくできる。

[0013] また、上記マルチコアファイバは、前記コアの外周面を囲む内側クラッドと、前記内側クラッドよりも低い屈折率とされると共に前記内側クラッドを囲む低屈折率層と、を備えることが好ましい。

[0014] コアが低屈折率層に囲まれることによって、当該コアを伝搬する光の径方向の広がりが小さくなるので、互いに隣り合うコアを伝搬する光同士の間隔が小さくなり、コア間クロストークが抑制される。ただし、コアが低屈折率層によって囲まれる場合、コア間距離が小さくなると複数のコアで囲まれるコアのカットオフ波長が長波長化することが知られている。しかし、上記マルチコアファイバでは、上記のように従来のマルチコアファイバよりもカットオフ波長が長波長化することがある程度許容されるので、従来のマルチコアファイバよりもコア間距離を小さくすることができる。

[0015] また、上記マルチコアファイバは、前記情報の伝送に用いられる光をLP₀。

$_{11}$ モードの光とすることができる。

[0016] この場合、シングルモード通信とされ、 LP_{01} モードより次数が一次高い LP_{11} モードの光はコアを1 km伝搬した時点で十分に減衰される。

[0017] もしくは、上記マルチコアファイバは、前記情報の伝送に用いられる光を LP_{01} モードの光及び LP_{11} モードとすることもできる。

[0018] この場合、フューモード通信とされ、 LP_{11} モードより高次モードの光はコアを1 km伝搬した時点で十分に減衰される。

[0019] また、上記マルチコアファイバでは、伝搬定数が異なる2種類のコアからなる総数32個のコアを、前記2種類のコアが交互になるように正方格子状に配置し、曲げ半径が100 mm以上でコア間クロストークを $-29\text{ dB}/100\text{ km}$ 以下とし、ファイバ径を $250\text{ }\mu\text{m}$ 以下とすることができる。

[0020] また、上記マルチコアファイバは、あるコアの中心と前記あるコアに最も近い位置に配置される他のコアの中心とを結ぶ線を半径とする円を基準円とし、直径280 mmの曲げが加えられるとき、3つ以上のコアと重なる前記基準円の中心に配置されるコアにおいて、前記情報の伝送に用いられる光の波長帯における前記情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が $1\text{ dB}/\text{m}$ 以下 $0.02\text{ dB}/\text{m}$ 以上であることが好ましい。

[0021] 多くのコアに囲まれるコアは、カットオフ波長が長波長化しやすいことが知られている。従って、上記のように3つ以上のコアに囲まれるコアにおいて余計な高次モードの光の伝搬損失が $0.02\text{ dB}/\text{m}$ 以上とされることによって、マルチコアファイバ全体において余計な高次モードの光が1 km伝搬した時点で十分に減衰されやすくなり、長距離通信に好適な光ファイバとすることができる。

[0022] また、上記マルチコアファイバは、6つの前記コアと重なる前記基準円の中心に配置される前記コアにおいて、前記情報の伝送に用いられる光の波長帯における前記情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が $1\text{ dB}/\text{m}$ 以下 $0.02\text{ dB}/\text{m}$ 以上であることが好ま

しい。

[0023] このようにコアが配置されることによって、複数のコアを高密度に配置することができる。

[0024] また、上記マルチコアファイバは、直径280mmの曲げが加えられるとき、全てのコアにおいて、前記情報の伝送に用いられる光の波長帯における前記情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が1dB/m以下0.02dB/m以上であることが好ましい。

[0025] 全てのコアにおいて余計な高次モードの光の伝搬損失が0.02dB/m以上とされることによって、マルチコアファイバ全体において余計な高次モードの光が1km伝搬した時点でより減衰されやすくなり、長距離通信により好適な光ファイバとすることができる。

[0026] 以上のように本発明によれば、長距離通信に好適なマルチコアファイバを提供することができる。

図面の簡単な説明

[0027] [図1]実施形態におけるマルチコアファイバの長手方向に垂直な断面の様子を示す図である。

[図2]図1に示すマルチコアファイバのそれぞれのコア要素の屈折率及び大きさを示す図である。

[図3]図1に示すマルチコアファイバに含まれるコアに説明のための番号を振った図である。

[図4]コアが六角形上に配置される例を示す図である。

[図5]コアが三角格子上に配置される例を示す図である。

[図6]コアが環状に配置されると共に当該環の中心にも配置される例を示す図である。

[図7]コアが二重環状に配置される例を示す図である。

[図8]表1に示す条件1において、各コアを囲う低屈折率層の厚さを変えたときの1kmカットオフ波長[μm]を示す図である。

[図9]表1に示す条件1において、各コアを囲う低屈折率層の厚さを変えたと

きの、曲げ直径を280mmにした場合にけるLP₀₁モードの光の曲げ損失[dB/km]とクラッドの中心から最も遠いコアの中心から被覆までの距離OCT(外側クラッド厚)[μm]との関係を示す図である。

[図10]表1に示す条件1において、相関長を50mmとしてコアを伝搬する光の波長を1565nmとしたときのコア間クロストークXT[dB/100km]と曲げ半径[mm]との関係の計算結果を示す図である。

[図11]表1に示す条件2において、各コアを囲う低屈折率層の厚さを変えたときの1kmカットオフ波長[μm]の計算結果を示す図である。

[図12]表1に示す条件2において、各コアを囲う低屈折率層の厚さを変えたときの、曲げ直径を280mmにした場合におけるLP₀₁モードの光の曲げ損失[dB/km]と距離OCT[μm]との関係の計算結果を示す図である。

[図13]表1に示す条件2において、相関長を50mmとしてコアを伝搬する光の波長を1565nmとしたときのコア間クロストークXT[dB/100km]と曲げ半径[mm]との関係の計算結果を示す図である。

[図14]表1に示す条件1において、各コアを囲う低屈折率層の厚さを変えたときの22mカットオフ波長[μm]の計算結果を示す図である。

[図15]表1に示す条件1において、各コアを囲う低屈折率層の厚さを変えたときの、曲げ直径を280mmにした場合におけるLP₀₁モードの光の曲げ損失[dB/km]と距離OCT[μm]との計算結果の関係を示す図である。

[図16]表1に示す条件1において、相関長を50mmとしてコアを伝搬する光の波長を1565nmとしたときのコア間クロストークXT[dB/100km]と曲げ半径[mm]との関係の計算結果を示す図である。

[図17]実施例3におけるマルチコアファイバの長手方向に垂直な断面の様子を図1と同様に示す図である。

[図18]LP₂₁モードの光の曲げ損失[dB/km]と互いに隣り合うコアの中心間距離Λとの関係を示す図である。

[図19]波長1550nmにおけるLP₁₁モードの光同士のコア間クロストークの大きさと互いに隣り合うコアの中心間距離Λとの関係を示す図である。

発明を実施するための形態

[0028] 以下、本発明に係るマルチコアファイバの好適な実施形態について図面を参照しながら詳細に説明する。なお、理解の容易のため、それぞれの図に記載のスケールと、以下の説明に記載のスケールとが異なる場合がある。

[0029] 図1は、本発明の実施形態におけるマルチコアファイバの長手方向に垂直な断面の様子を示す図である。図1に示すように、本実施形態のマルチコアファイバ1は、16個の第1コア要素10及び16個の第2コア要素20を備え、これら第1コア要素10及び第2コア要素20の外周面を隙間なく囲む外側クラッド30を備える。なお、図が煩雑になること防ぐため、図1及び以下に示す他の図において、同様の構成要素については一部にのみ符号が付され、他の同様の構成要素に付すべき符号が省略されている。また、図1には示されていないが、マルチコアファイバ1は樹脂等で被覆されている。

[0030] 第1コア要素10は、第1コア11と、第1コア11の外周面を隙間なく囲む内側クラッド12と、内側クラッド12の外周面を隙間なく囲み、外側クラッド30に外周面が隙間なく囲まれる低屈折率層13とを有している。また、第2コア要素20は、第2コア21と、第2コア21の外周面を隙間なく囲む内側クラッド22と、内側クラッド22の外周面を隙間なく囲み、外側クラッド30に外周面が隙間なく囲まれる低屈折率層23とを有している。本実施形態では、図に示す通り、第1コア要素10の径が第2コア要素20の径より小さくされている。なお、以下の説明において、単にコアという場合は第1コア11及び第2コア21の両方を意味する場合があり、単にコア要素という場合は第1コア要素10及び第2コア要素20の両方を意味する場合がある。

[0031] 第1コア11と第2コア21とは、交互になるように正方格子上に配置されている。また、第1コア11と第2コア21とは、互いに伝搬定数が異な

る。このように伝搬定数が互いに異なる第1コア11と第2コア21とが交互になるように配置されていることにより、マルチコアファイバ1では位相整合が起きにくく、コア間クロストークが抑制されやすい。また、第1コア11と第2コア21とが正方格子上に配置されていることにより、2種のコアを交互になるように且つ所定の範囲内にできる限り多く配置することが容易である。

[0032] 図2は、図1に示すマルチコアファイバ1の第1コア要素10及び第2コア要素20の屈折率及び大きさを示す図である。図2(A)では、第1コア要素10及び第2コア要素20が並べて示され、図2(B)では、第1コア要素10と第2コア要素20との間を外側クラッド30で埋めた場合について、屈折率が実線で示されている。

[0033] 本実施形態では、上記のように第1コア11と第2コア21とは屈折率及び大きさが異なるように形成されている。また、第1コア11の屈折率は内側クラッド12の屈折率よりも高く、低屈折率層13の屈折率は内側クラッド12の屈折率及び外側クラッド30の屈折率よりも低くされている。第2コア21の屈折率は内側クラッド22の屈折率よりも高く、低屈折率層23の屈折率は内側クラッド22の屈折率及び外側クラッド30の屈折率よりも低くされている。なお、本実施形態では、内側クラッド12の屈折率は外側クラッド30の屈折率と同じ屈折率とされている。また、内側クラッド22の屈折率は外側クラッド30の屈折率と同じ屈折率とされている。

[0034] 以下の説明において、図2に示すように、第1コア11の外側クラッド30に対する比屈折率差を Δ_{11} 、低屈折率層13の外側クラッド30に対する比屈折率差を Δ_{12} 、第2コア21の外側クラッド30に対する比屈折率差を Δ_{21} 、低屈折率層23の外側クラッド30に対する比屈折率差を Δ_{22} とする。また、第1コア11の半径を r_{11} 、低屈折率層13の内周の半径を r_{12} 、低屈折率層13の外周の半径を r_{13} 、低屈折率層13の厚さを $W_1 (= r_{13} - r_{12})$ 、第2コア21の半径を r_{21} 、低屈折率層23の内周の半径 r_{22} 、低屈折率層23の外周の半径を r_{23} 、低屈折率層23の厚さを $W_2 (= r_{23} - r_{22})$ とする。

$_{22})$ とする。なお、マルチコアファイバ1では、下記関係式が成り立っている。

$$r_{11} > r_{21}$$

$$r_{12} / r_{11} = r_{22} / r_{21}$$

$$r_{12} > r_{22}$$

$$\Delta_{11} > \Delta_{21}$$

$$\Delta_{12} = \Delta_{22}$$

$$W_2 > W_1$$

[0035] マルチコアファイバ1は、直径280mmの曲げが加えられるとき、情報の伝送に用いられる光の波長帯における情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が1dB/m以下0.02dB/m以上となる第1コア11及び第2コア21を備える。ここで、情報の伝送に用いられる光の波長帯とは、例えばCバンドとすることができる。また、情報の伝送に用いられる光とは、例えばLP₀₁モードの光とすることができる。また、上記のように光を伝搬させるには、例えば、 $r_{11} = 4.80 \mu\text{m}$ 、 $r_{12} / r_{11} = 1.7$ 、 $W_1 / r_{11} = 0.3$ 、 $r_{21} = 4.60 \mu\text{m}$ 、 $r_{22} / r_{21} = 1.7$ 、 $W_2 / r_{21} = 1.1$ 、 $\Delta_{11} = 0.35\%$ 、 $\Delta_{12} = -0.7\%$ 、 $\Delta_{21} = 0.30\%$ 、 $\Delta_{22} = -0.7\%$ 、ファイバの中心から最も外側に配置されるコアの中心からマルチコアファイバ1の被覆までの距離OCT = 37.3 μm 、ファイバ径 = 234.37 μm とすればよい。

[0036] マルチコアファイバ1では、情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光、すなわち余計な高次モードの光の伝搬損失が0.02dB/m以上である。これにより、マルチコアファイバ1では、余計な高次モードの光はコアを1km伝搬したときに十分減衰される。例えば、情報の伝送に用いられる光をLP₀₁モードの光とすれば、LP₁₁モードの光は1km伝搬した時点で十分に減衰される。長距離通信を行う場合、通常は短くても1km程度の間隔で複数の光ファイバが接続される。伝送される信号の品質の悪化やクロストークの要因となる高次モードの光は、光ファイバ同士

または光ファイバと入出力デバイスや増幅器等各種デバイスとの接続点での軸ずれによって発生することが知られている。上記のように余計な高次モードの光が1 km伝搬したときに十分減衰されることによって、マルチコアファイバ1同士の接続点やマルチコアファイバ1と各種デバイスとの接続点で余計な高次モードの光が生じたとしても、次の接続点までにはその余計な高次モードの光は十分減衰される。よって、マルチコアファイバ1が複数接続されて構成される伝送路全体では、高次モードの光の累積が抑制される。従って、マルチコアファイバ1は長距離通信に好適である。

[0037] ところで、従来のマルチコアファイバでは、上記のように2 mファイバカットオフ波長や22 mケーブルカットオフ波長を基準としてコア間距離などが設計されている。しかし、マルチコアファイバ1では、余計な高次モードの光の伝搬損失が1 dB/m以下であることから、余計な高次モードの光が2 mや22 m伝搬した時点では十分に減衰されていないことがある。マルチコアファイバ1では、22 mケーブルカットオフ波長が情報の伝送に用いられる光の波長帯以上になっていても、1 kmカットオフ波長は情報の伝送に用いられる光の波長帯以下になる。このように、マルチコアファイバ1では、従来のマルチコアファイバよりもカットオフ波長が長波長化することがある程度許容される。そのため、マルチコアファイバ1では、コアの外側クラッド30に対する比屈折率差を大きくする等してコア間クロストークを抑制することが可能であり、従来のマルチコアファイバよりもコア間距離を小さくすることができる。その結果、マルチコアファイバ1では、ファイバ径を一定とする場合に1つのマルチコアファイバ1に備えられるコア数を増やすことができるので、伝送可能な情報量を増大させることができる。従って、マルチコアファイバ1は、長距離大容量通信に好適である。

[0038] また、マルチコアファイバ1によれば、上記のように従来のマルチコアファイバよりもコア間距離を小さくすることができることから、外側クラッド30を小さくしてファイバ径（外側クラッド30の外周の直径）を小さくすることもできる。マルチコアファイバ1のファイバ径は特に限定されないが

、 $250\mu\text{m}$ 以下とすることができ、長期に亘って信頼性を確保する観点からは、 $230\mu\text{m}$ 程度であることが好ましい。

[0039] また、マルチコアファイバ1によれば、第1コア11が低屈折率層13に囲まれると共に第2コア21が低屈折率層23に囲まれていることによって、第1コア11及び第2コア21を伝搬する光の径方向の広がりが小さくなるので、互いに隣り合うコアを伝搬する光同士の重なりが小さくなり、コア間クロストークが抑制される。ただし、コアが低屈折率層によって囲まれる場合、コア間距離が小さくなると複数のコアに囲まれるコアのカットオフ波長が長波長化することが知られている。しかし、マルチコアファイバ1では、上記のように従来のマルチコアファイバよりもカットオフ波長が長波長化することがある程度許容されるため、従来のマルチコアファイバよりもコア間距離を小さくすることができる。

[0040] 以上、本発明について、上記実施形態を例に説明したが、本発明はこれらに限定されるものではない。

[0041] 例えば、上記実施形態では、屈折率及び大きさが異なり、伝搬定数が異なる第1コア11及び第2コア21を備える例を挙げて説明したが、第1コア11及び第2コア21における屈折率や大きさの少なくとも一方が同じであっても良く、それぞれの伝搬定数が同じであっても良い。

[0042] また、上記実施形態のマルチコアファイバ1は、直径 280mm の曲げが加えられるとき情報の伝送に用いられる光の波長帯における情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が $1\text{dB}/\text{m}$ 以下 $0.02\text{dB}/\text{m}$ 以上である第1コア11及び第2コアを備える。しかし、直径 280mm の曲げが加えられるとき、情報の伝送に用いられる光の波長帯における情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が $1\text{dB}/\text{m}$ 以下 $0.02\text{dB}/\text{m}$ 以上であるコアを少なくとも1つ備えていればよい。

[0043] ただし、あるコアの中心と当該あるコアに最も近い位置に配置される他のコアの中心とを結ぶ線を半径とする円を基準円とし、直径 280mm の曲げ

が加えられるとき、3つ以上のコアと重なる基準円の中心に配置されるコアにおいて、情報の伝送に用いられる光の波長帯における情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が 1 dB/m 以下 0.02 dB/m 以上であることが好ましい。図3を参照して以下により詳細に説明する。

[0044] 図3は、図1に示すマルチコアファイバ1に備えられるコア要素に番号を振った図である。例えば、図3の示すように各コア要素に番号を振ると、No. 1, 4, 6, 9, 11, 14, 16, 19のコア要素を中心とする基準円上には2個のコア要素が重なり、No. 2, 3, 7, 8, 12, 13, 17, 18のコア要素を中心とする基準円上には3個のコア要素が重なり、その他のコア要素を中心とする基準円上には4個のコア要素が重なる。コア要素がコアを囲う低屈折率層を有する場合、上記のように内側に配置されるコア要素は外側に配置されるコア要素よりも多くのコア要素に囲まれる。このように多くのコア要素に囲まれるコアは、カットオフ波長が長波長化しやすいことが知られている。従って、上記のように3つ以上のコアに囲まれるコアにおいて余計な高次モードの光の伝搬損失が 0.02 dB/m 以上とされることによって、マルチコアファイバ1全体において余計な高次モードの光が 1 km 伝搬した時点で十分に減衰されやすくなり、長距離通信に好適な光ファイバとすることができる。

[0045] なお、全てのコアにおいて、情報の伝送に用いられる光の波長帯における情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が 0.02 dB/m 以上であることによって、マルチコアファイバ1全体において余計な高次モードの光が 1 km 伝搬した時点でより減衰されやすくなり、長距離通信により好適な光ファイバとすることができる。

[0046] また、上記実施形態では、低屈折率層13及び低屈折率層23が備えられる例を示して説明したが、低屈折率層13及び低屈折率層23は、どちらか一方又は両方が備えられていなくてもよい。

[0047] また、上記実施形態では、第1コア11及び第2コア21からなる総数3

2個のコアが正方格子上に配置される例を示して説明した。しかし、マルチコアファイバに備えられるコアの総数、コアの種類の数、コアの配置は、これに限定されない。他のコアの配置の例を図4から図7に示す。

[0048] 図4に示すマルチコアファイバ2では、総数12個のコア15が六角形の各頂点及び各辺上に配置されている。このような構造では、全てのコアについて近接するコアの数及びその近接するコアとの距離を同じにすることができる。全てのコアについて近接するコア数及びコア間距離が同じにされることによって、全てのコアのパラメータが同じであれば、全てのコアの伝搬損失を同じにすることができる。このように全てのコアの伝搬損失が同じであれば、全てのコアについて、直径280mmの曲げが加えられるときに情報の伝送に用いられる光の波長帯における情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失を1dB/m以下0.02dB/m以上とすることが容易である。そして、このような全てのコアの伝搬損失が1dB/m以下0.02dB/m以上であるマルチコアファイバでは、従来のように全てのコアの伝搬損失が1dB/mより大きいマルチコアファイバと比べて、いずれのコアでも閉じ込め損失が強くなるので、クロストークの改善やコア間距離を小さくすることができると考えられる。

[0049] なお、図4では12個のコアが六角形上に配置される例を挙げたが、上記のように全てのコアについて近接するコアの数及びその近接するコアとの距離を同じにするという観点からは、コアの数及び配置は図4に示す形態には限定されない。コアの総数は特に限定されない。また、コアの配置については、例えば、正多角形の各頂点上にコアが配置されても良く、正多角形の各頂点上及び各辺上に等間隔に複数のコアが配置されても良く、環状に等間隔に複数のコアが配置されても良い。

[0050] また、図5に示すマルチコアファイバ3では、総数19個のコア15が三角格子上に配置されている。また、図6に示すマルチコアファイバ4では、複数のコア15が環状に配置されると共にその環の中心にもコア15が配置されている。また、図7に示すマルチコアファイバ5では、六角形の各頂点

にコア 15 が配置されると共に当該六角形の内側において当該六角形と中心を共有し 30 度ずれた他の六角形の各頂点にもコア 15 が配置されている。なお、これらの形態において、コア 15 の全部を第 1 コア要素 10 と同様の構成としたり、コア 15 の一部を第 1 コア要素 10 と同様の構成とすると共に他の一部を第 2 コア要素 20 と同様の構成としたりすることもできる。

[0051] また、上記実施形態では、情報の伝送に用いられる光として LP_{01} モードの光を例示したが、 LP_{11} モードやより高次モードの光も情報の伝送に用いられてもよい。例えば、 LP_{01} モードの光及び LP_{11} モードの光が情報の伝送に用いられ、 LP_{11} モードより高次モードの光が 1 km 伝搬後に十分に減衰される形態とされてもよい。

[0052] また、上記実施形態では、コアの屈折率が径方向に概ね一定である所謂ステップインデックス型を例示して説明したが、コアの屈折率は、径方向の外側から中心に向かって徐々に高くなっていてもよく、径方向の外側から中心に向かって段階的に高くなっていてもよく、中心部が外周部より低くなっていてもよい。

実施例

[0053] 以下、実施例及び比較例を挙げて本発明をより具体的に説明するが、本発明は、以下の実施例に限定されるものではない。

[0054] <実施例 1>

図 1 に示すマルチコアファイバ 1 に相当するマルチコアファイバについて、以下に示す条件でシミュレーションを行った。

[0055] 第 1 コア 11 の半径 r_{11} と低屈折率層 13 の内周の半径 r_{12} との比 $r_{12}/r_{11}=1.7$ 、第 2 コア 21 の半径 r_{21} と低屈折率層 23 の内周の半径 r_{22} との比 $r_{22}/r_{21}=1.7$ 、低屈折率層 13 の外側クラッド 30 に対する比屈折率差 $\Delta_{12}=-0.7\%$ 、低屈折率層 23 の外側クラッド 30 に対する比屈折率差 $\Delta_{22}=-0.7\%$ とした。この場合、最も外側に配置されるコアの中心からマルチコアファイバ 1 の被覆までの距離 $OC T=35\mu m$ 、外側クラッド 30 の外周の直径 $=230\mu m$ とすると、互いに隣り合うコアの中心

間距離 $\Lambda = 27.4 \mu\text{m}$ となる。

[0056] このようなマルチコアファイバ1において、図3に示すNo. 21~32のコアを中心とする基準円上には4つのコアが配置される。このように内側に配置されるコアは外側に配置される他のコアよりもカットオフ波長が長波長化すると考えられる。このマルチコアファイバ1が曲げ直径280mmで曲げられるときに、これらの内側に配置されるコアにおけるLP₁₁モードの光の1kmカットオフ波長が1500nm以下（波長1500nmにおいて伝搬損失が0.02dB/m以上）となり、且つ最も外側に配置されるコアの中心からマルチコアファイバ1の被覆までの距離OCTが最小になる（ファイバ径が最小になる）ときのコアのパラメータを検討した。その結果を下記表1に示す。なお、コアを伝搬する光の波長が1550nmである場合の有効断面積A_{eff}は、従来のシングルモードファイバと同等で80μm²になる。

[0057] 表1

		条件1	条件2	条件3
第1コア	$\Delta_{11}[\%]$	0.35	0.35	0.36
	$r_{11}[\mu\text{m}]$	4.80	4.80	4.85
第2コア	$\Delta_{21}[\%]$	0.30	0.31	0.31
	$r_{21}[\mu\text{m}]$	4.60	4.65	4.65

[0058] 表1に示す条件1において各コアを囲う低屈折率層の厚さを変えたときの、1kmカットオフ波長[μm]を図8に、曲げ半径Rを140mm（曲げ直径を280mm）にしたときのLP₀₁モードの光の曲げ損失[dB/km]と距離OCT[μm]との関係を図9に、相関長を50mmとしてコアを伝搬する光の波長を1565nmとした場合のコア間クロストークXT[dB/100km]と曲げ半径[mm]との関係を図10に、それぞれ示す。

[0059] また、表1に示す条件2において各コアを囲う低屈折率層の厚さを変えたときの、1kmカットオフ波長[μm]を図11に、曲げ半径Rを140mm（曲げ直径を280mm）にしたときのLP₀₁モードの光の曲げ損失[dB/km]と距離OCT[μm]との関係を図12に、相関長を50mmとしてコアを伝搬する光の波長を1565nmとした場合のコア間クロストー

ク \times T [dB/100km] と曲げ半径 [mm] との関係を図13に、それぞれ示す。

[0060] 以下に説明するように、表1に示す条件1の場合、低屈折率層13の厚さ W_1 と第1コア11の半径 r_{11} との比 W_1/r_{11} を0.4以上に設定しても、必要な距離OCTは変化しないことがわかる。必要な距離OCTは、図9からわかる。すなわち、図9において、低屈折率層の厚さの条件(W_1/r_{11} 又は W_2/r_{21})毎に引かれる線とLP₀₁モードの光の伝搬損失が0.001dB/kmとなる線(図9の破線)とが交差する位置で必要となる距離OCTが決まる。ここで、 W_1/r_{11} をより大きくする場合を考えると、図8からわかるように、 W_2/r_{21} が小さくなる。すなわち、低屈折率層23の厚さ W_2 が小さくなる。次に、図9を見ると、 W_1/r_{11} が大きくなれば第1コア11に着目した場合に必要な距離OCTは小さくなるが、 W_2 が小さくなることから、第2コア21に着目した場合に必要な距離OCTは大きくなる。従って、第1コア11及び第2コア21の両方を基準として考えた場合に最小となる距離OCTが存在することがわかる。また、図10からは、コア間クロストーク \times Tが最も大きくなるときの曲げ半径とマルチコアファイバ1の通常の使用状態を想定した場合の曲げ半径(100mm以上)でのクロストークがわかる。

[0061] また、条件1と同様にして、条件2についても図11～図13から、LP₀₁モードの光の曲げ損失が0.001dB/kmとなり距離OCTを小さくできるという観点から好ましい W_1/r_{11} 及び W_2/r_{21} の値、そのときの距離OCTの値及びファイバ径、コア間クロストーク \times Tが最も大きくなるときの曲げ半径とマルチコアファイバ1の通常の使用状態を想定した場合の曲げ半径(100mm以上)でのクロストークがわかる。

[0062] 上記のように考えて表1に示す各条件に基づいて得られた計算結果を下記表2に示す。表2に示す \times T($d=50$ mm)は、相関長 d を50mmとしてコアを伝搬する光の波長が1565nmとした場合の曲げ半径155mmでのコア間クロストーク \times T [dB/100km]であり、 R_{pk} はコア間ク

ロストークX Tが最も大きくなるときの曲げ半径である。

[0063] 表2

	W_1/r_{11}	W_2/r_{21}	OCT [μm]	ファイバ径 [μm]	XT(d=50mm) [dB/100km]	R_{pk} [mm]
条件1	0.3	1.1	37.3	234.37	-19	55
条件2	0.4	1.0	36.7	233.17	-18	67
条件3	0.2	0.9	37.2	234.17	-15	55

[0064] 条件2と条件3とを比較すると、条件3の場合の方がコア間クロストークX Tが大きい。これは、条件3の方が第1コア11の外側クラッド30に対する比屈折率差 Δ_{11} が大きく、カットオフ波長を所定の値以下とするために必要となる低屈折率層13の厚さ W_1 が小さいからである。条件1と条件2とを比較すると、条件1の方が条件2の場合よりも距離OCTが厚くなっている。これは、条件1の方が第2コア21の外側クラッド30に対する比屈折率差 Δ_{21} が小さく、第2コア21に光を閉じ込め難くなっているからである。第1コア11の比屈折率差 Δ_{11} を小さくして第2コア21の比屈折率差 Δ_{21} を大きくする等して第1コア11と第2コア21との間の伝搬定数の差が小さくなると、 R_{pk} が大きくなる。

[0065] <比較例1>

表1に示す条件1のパラメータを用い、各コアを囲う低屈折率層の厚さを変えたときの、22mカットオフ波長[μm]を図14に、曲げ半径Rを140mm（曲げ直径を280mm）にしたときのLP₀₁モードの光の曲げ損失[dB/km]と距離OCT[μm]との関係を図15に、相関長を50mmとしてコアを伝搬する光の波長を1565nmとした場合のコア間クロストークX T[dB/100km]と曲げ半径[mm]との関係を図16に、それぞれ示す。図14～図16からは、22mカットオフ波長が1500nm以下となるようにした以外は実施例1と同様にして、LP₀₁モードの光の曲げ損失が0.001dB/kmとなり距離OCTを小さくできるという観点から好ましい W_1/r_{11} 及び W_2/r_{21} の値、そのときの距離OCTの値及びファイバ径、コア間クロストークX Tが最も大きくなるときの値及びそのときの曲げ半径がわかる。その計算結果を下記表3に示す。

[0066] 表3

	W_1/r_{11}	W_2/r_{21}	OCT [μm]	ファイバ径 [μm]	XT(d=50mm) [dB/100km]
条件1	0.2	1.0	38.0	235.0	-15.1
条件2	0.3	1.0	39.5	238.8	-16.0
条件3				245以上	

[0067] (実施例1と比較例1との比較)

表2に示す結果は、直径280mmの曲げが加えられるとき、伝搬損失が最も小さいコアにおいて、波長1500nmにおけるLP₁₁モードの光の伝搬損失が1dB/m以下0.02dB/m以上となるように各パラメータが検討されている。すなわち、表2に示す結果は、LP₁₁モードの光が1km伝搬したときには十分減衰されるように各パラメータが検討されている。一方、表3に示す結果は、直径280mmの曲げが加えられるとき、全てのコアにおいて、波長1500nmにおけるLP₁₁モードの光の伝搬損失が1dB/mより大きくなるように各パラメータが検討されている。すなわち、表3に示す結果は、LP₁₁モードの光が22m伝搬したときに十分減衰されるように各パラメータが検討されている。

[0068] 実施例1(表2)と比較例1(表3)とを比較することによって、光が1km伝搬した後におけるカットオフ波長を基準としてコア間距離やコアの屈折率等を規定した方が、光が22m伝搬した後におけるカットオフ波長を基準とするよりも、ファイバ径を小さくしつつコア間クロストークを低減できることが確認された。

[0069] <実施例2及び比較例2>

実施例2に係るマルチコアファイバとしてファイバAを作製し、比較例2に係るマルチコアファイバとしてファイバBを作製した。ファイバAは実施例1のマルチコアファイバと同様である。ファイバBは、直径280mmの曲げが加えられるとき、全てのコアにおいて、波長1530nmにおけるLP₁₁モードの光の伝搬損失が1dB/mより大きいということ以外は、ファイバAと同様である。ファイバA及びファイバBのパラメータを下記表4及び表5に示す。また、ファイバA及びファイバBの光学測定結果を表6に示

す。なお、表6及び以下に示す表7において、コア番号は図3に示すコア要素の番号に対応している。

[0070]

表4

		ファイバA	ファイバB
第1コア	$\Delta_{11}[\%]$	0.35	0.35
	$r_{11}[\mu\text{m}]$	4.80	4.80
	W_1/r_{11}	0.58	0.45
第2コア	$\Delta_{21}[\%]$	0.31	0.31
	$r_{21}[\mu\text{m}]$	4.65	4.65
	W_2/r_{21}	1.03	1.00

[0071]

表5

	ファイバA	ファイバB
平均コア間距離 $[\mu\text{m}]$	28.8	29.0
OCT $[\mu\text{m}]$	37.2	37.6
ファイバ径 $[\mu\text{m}]$	242.5	243.8

[0072]

表6

コア番号	ファイバA			ファイバB		
	22m カットオフ [nm]	1km カットオフ [nm]	Aeff at 1550nm [μm^2]	22m カットオフ [nm]	1km カットオフ [nm]	Aeff at 1550nm [μm^2]
1	1433	1374	83.0	1335	1302	80.9
2	1398	1273	80.3			
3	1401	1372				
4	1373	1209		1307	1214	80.6
5	1635	1493	81.5	1375	1352	81.5
6	1355	1248	82.5			
7	1423	1376				
8	1380	1184				
9	1520	1395	82.3			
10	1639	1264	80.9	1406	1344	80.6
11	1462	1402		1372	1307	82.3
12	1399	1251				
13	1410	1375				
14	1352	1193	83.9	1317	1219	80.5
15	1634	1376		1352	1306	80.1
16	1372	1230				
17	1409	1380				
18	1374	1223				
19	1401	1380	82.6			
20	1635	1507	81.9	1404	1245	79.6
21	1626	1518				
22	1627	1522				
23	1625	1520	81.1	1402	1367	80.6
24	1630	1518		1384	1343	80.7
25	1620	1522	81.4	1404	1368	81.4
26	1621	1516				
27	1619	1526				
28	1619	1527				
29	1622	1516		1412	1371	81.5
30	1647	1528	82.2	1408	1321	78.9
31	1617	1516	81.2	1433	1359	79.8
32	1622	1512	80.5	1432	1368	78.8

[0073] 表6からわかるように、ファイバAでは、内側に配置される一部のコアにおいて22mカットオフ波長が1600nmを超えているが、全てのコアにおいて1kmカットオフ波長は1530nmを下回っていた。一方、ファイバBでは、従来のマルチコアファイバと同様に、全てのコアにおいて、22mカットオフ波長が1530nmを下回っていた。

[0074] 下記表7には、ファイバA及びファイバBのそれぞれについて、No. 6, 11, 22, 29のコアを励振させたときの最悪クロストーク[dB]の測定結果を、光がコアを100km伝搬した後の値に換算して示す。ここで

、最悪クロストークとは、すべてのコアに信号を伝送した時を想定したクロストークであり、ここでは、互いに最も近い2つのコア間のクロストークと正方格子の対角線上に配置される第二近接コア同士の間のクロストークとの合計である。よって、最悪クロストークを考える場合のクロストークの組み合わせ数は、励振されるコアの位置によって異なる。表7に示す結果は、コアを伝搬する光の波長が1550nmである場合と、Cバンドにおいてクロストークが最も大きくなると考えられる、コアを伝搬する光の波長が1565nmである場合とについて、ファイバの巻直径を310mmとして最悪クロストークを測定した結果である。

[0075] 表7

コア番号	ファイバA		ファイバB	
	1550nm	1565nm	1550nm	1565nm
6	-43.1	-41.5	-33.3	-32.2
11	-40.3	-38.5	-28.1	-26.6
22	-39.5	-37.8	-31.7	-30.9
29	-36.5	-34.5	-31.7	-30.9

[0076] ファイバAとファイバBとを比較すると、ファイバAの方が全てのコアでクロストークが小さくなっていた。これは、ファイバAの方については、1kmカットオフ波長を基準としてコア間距離やコアの屈折率等を設計したことによると考えられる。

[0077] なお、ファイバAの R_{pk} は100mm以下であり、具体的には60mm程度であった。長距離通信に用いられるケーブル内での光ファイバの曲げ半径が数百mmになることを考えると、ファイバAを長距離通信に用いる場合に曲げによるクロストークの過度な増大は起こりにくいと考えられる。また、ファイバAは、四相位相変調（QPSK）信号を1000km伝送するのに必要とされるクロストークの条件である $-29\text{ dB}/100\text{ km}$ よりクロストークが小さかった。

[0078] また、モード変換器により生成した波長1530nmの LP_{11} モードの光をファイバAのNo. 23のコアに入力した。その結果、入力端から22mの位置ではカットオフ波長が1600nm以上であるため、 LP_{11} モードの光が観測された。しかし、入力端から1kmの位置ではカットオフ波長が1

530nm以下であるため、 LP_{11} モードの光が十分に損失しており、モード変換器内のクロストークにより生じた LP_{01} モードの光が観測された。このように、ファイバAでは、光がコアを1km伝搬した後は余計な高次モードの光が十分に減衰されてシングルモードとなることが確認された。

[0079] <実施例3>

図17は、実施例3におけるマルチコアファイバの長手方向に垂直な断面の様子を図1と同様に示す図である。実施例3では、図17に示すように、外側クラッド30の中心と当該中心を中心とする正六角形の各頂点とに第1コア要素10が配置されるマルチコアファイバ6を作製した。このマルチコアファイバ6では、外側クラッド30の中心に配置されるコアを中心とする基準円上には6つのコアが配置される。上述したように、他のコア要素に囲まれるコアでは、他のコアよりカットオフ波長が長波長化し易い。よって、このマルチコアファイバ6では、外側クラッド30の中心に配置されるコアはカットオフ波長が長波長化し易い。また、本実施例では、 LP_{01} モードの光及び LP_{11} モードの光によって情報の伝送し得るように、マルチコアファイバ6を設計した。マルチコアファイバ6の各パラメータは下記表8に示す通りである。表8における Δ_{11} 、 r_{11} 、 r_{12} 、 W_{11} は図2(B)を用いて定義した通りである。 $A_{eff}(LP_{01})$ はコアを伝搬する LP_{01} モードの光の波長が1550nmである場合の有効断面積であり、 $A_{eff}(LP_{11})$ はコアを伝搬する LP_{11} モードの光の波長が1550nmである場合の有効断面積である。

[0080] 表8

Δ_{11} [%]	r_{11} [μm]	r_{12}/r_{11}	W_{11}/r_{11}	$A_{eff}(LP_{01})$ [μm^2]	$A_{eff}(LP_{11})$ [μm^2]
0.42	6.4	1.8	0.8	110	175

[0081] 図18は、曲げ半径Rを140mm（曲げ直径を280mm）にしたときの LP_{21} モードの光の曲げ損失[dB/km]と互いに隣り合うコアの中心間距離 Λ との関係を示す。本実施例では、上記のように LP_{01} モードの光及び LP_{11} モードの光を情報の伝送に用いるため、 LP_{11} モードより高次モードの光である LP_{21} モードの光の伝搬が抑制されることが求められる。図1

8から、22 mケーブルカットオフ波長を1530 nm以下とするためには、すなわちLP₂₁モードの光の伝搬損失を1 dB/m以上とするためには、コア間距離Λを42.5 μm以上にする必要があることがわかる。一方、1 kmカットオフ波長を1530 nm以下とするためには、すなわちLP₂₁モードの光の伝搬損失を0.02 dB/m以上とするためには、コア間距離Λが38.8 μm程度まで小さくされても良いことがわかる。

[0082] 図19は、波長1550 nmにおけるLP₁₁モードの光同士のコア間クロストークの大きさと互いに隣り合うコアの中心間距離Λとの関係を示す。図19より、コア間距離Λが38.8 μmまで小さくされても、100 km伝搬後のクロストークが−30 dB以下であり、QPSK信号を伝送可能であることがわかる。

[0083] <比較例3>

実施例3のマルチコアファイバ作製に用いた母材と同様の母材を用いて、コア間距離が45 μmとなるように狙って線引した以外は実施例3と同様に、比較例3に係るマルチコアファイバを作製した。比較例3に係るマルチコアファイバでは、コア間距離Λが42.5 μm以上とされたため、上記のように全てのコアにおいて22 mケーブルカットオフ波長が1530 nm以下になると考えられる。実施例3に係るマルチコアファイバと比較例3に係るマルチコアファイバとのコア間距離Λ、距離OCT及びファイバ径の測定結果を下記表9に示す。また、実施例3に係るマルチコアファイバ6と比較例3に係るマルチコアファイバとの光学測定結果を下記表10に示す。なお、表10に示すカットオフ波長は、外側クラッド30の中心に配置されたコアについて測定した結果である。

[0084] 表9

	コア間距離Λ [μm]	OCT [μm]	ファイバ径 [μm]
実施例3	39.0	51.6	181.0
比較例3	46.2	51.6	195.4

[0085]

表10

		実施例3	比較例3
MFD [μ m]	1550nm	11.5	11.5
	1625nm	11.8	11.8
A_{eff} [μ m]	1550nm	112.7	112.7
	1625nm	117.7	117.7
伝搬損失 [dB/km]	1550nm	0.229	0.229
	1625nm	0.239	0.239
DMD [ps/km]	1550nm	2.7×10^3	2.7×10^3
波長分散 [ps/nm/km]	1550nm	21.3	21.3
22mカットオフ波長(中心コア) [nm]		1620	1420
1kmカットオフ波長(中心コア) [nm]		1528	1370

[0086] 実施例3に係るマルチコアファイバと比較例3に係るマルチコアファイバとは、同様の母材を用いているため、表10に示すようにカットオフ波長以外の光学特性は同じとなった。また、表9に示したように、実施例3に係るマルチコアファイバでは比較例3に係るマルチコアファイバに対してファイバ径を小さくすることができた。このようにファイバ径を小さくし得る効果は、マルチコアファイバに備えられるコアの数が多くなる程顕著になる。

[0087] 以上に説明した本発明に係るマルチコアファイバは、長距離通信に好適であり、光通信の産業において利用することができる。

符号の説明

- [0088] 1, 2, 3, 4, 5, 6・・・マルチコアファイバ
- 10・・・第1コア要素
- 11・・・第1コア
- 12・・・内側クラッド
- 13・・・低屈折率層
- 15・・・コア
- 20・・・第2コア要素
- 21・・・第2コア
- 22・・・内側クラッド
- 23・・・低屈折率層
- 30・・・外側クラッド

請求の範囲

- [請求項1] 直径280mmの曲げが加えられるとき、情報の伝送に用いられる光の波長帯における前記情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が1dB/m以下0.02dB/m以上であるコアを少なくとも1つ備えることを特徴とするマルチコアファイバ。
- [請求項2] 前記コアの外周面を囲む内側クラッドと、前記内側クラッドよりも低い屈折率とされると共に前記内側クラッドを囲む低屈折率層と、を備えることを特徴とする請求項1に記載のマルチコアファイバ。
- [請求項3] 前記情報の伝送に用いられる光がLP₀₁モードの光であることを特徴とする請求項1または2に記載のマルチコアファイバ。
- [請求項4] 前記情報の伝送に用いられる光がLP₀₁モードの光及びLP₁₁モードの光であることを特徴とする請求項1または2に記載のマルチコアファイバ。
- [請求項5] 伝搬定数が異なる2種類のコアからなる総数32個のコアが、前記2種類のコアが交互になるように正方格子状に配置され、
曲げ半径が100mm以上でコア間クロストークが-29dB/100km以下であり、
ファイバ径が250μm以下であることを特徴とする請求項1から4のいずれか1項に記載のマルチコアファイバ。
- [請求項6] あるコアの中心と前記あるコアに最も近い位置に配置される他のコアの中心とを結ぶ線を半径とする円を基準円とし、
直径280mmの曲げが加えられるとき、3つ以上のコアと重なる前記基準円の中心に配置されるコアにおいて、前記情報の伝送に用いられる光の波長帯における前記情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が1dB/m以下0.02dB/m以下であることを特徴とする請求項1から5のいずれか1項に記載のマルチコアファイバ。

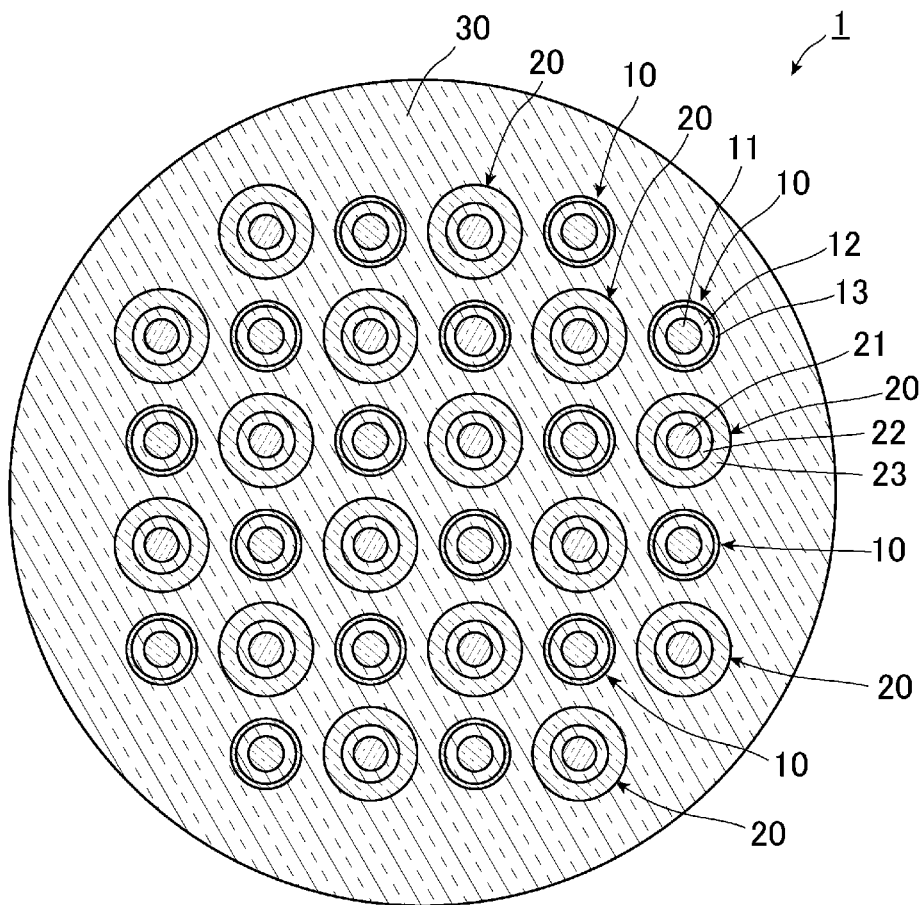
B/m 以上である

ことを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載のマルチコアファイバ。

[請求項7] 6つの前記コアと重なる前記基準円の中心に配置される前記コアにおいて、前記情報の伝送に用いられる光の波長帯における前記情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が $1 \text{ dB}/m$ 以下 $0.02 \text{ dB}/m$ 以上であることを特徴とする請求項 6 に記載のマルチコアファイバ。

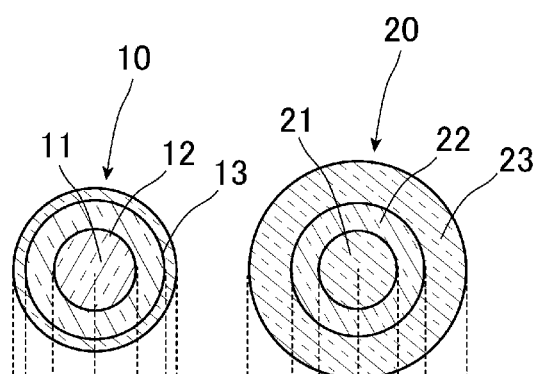
[請求項8] 直径 280 mm の曲げが加えられるとき、全てのコアにおいて、前記情報の伝送に用いられる光の波長帯における前記情報の伝送に用いられる光のモードより次数が一次高いモードの光の伝搬損失が $1 \text{ dB}/m$ 以下 $0.02 \text{ dB}/m$ 以上であることを特徴とする請求項 1 から 7 のいずれか 1 項に記載のマルチコアファイバ。

[図1]

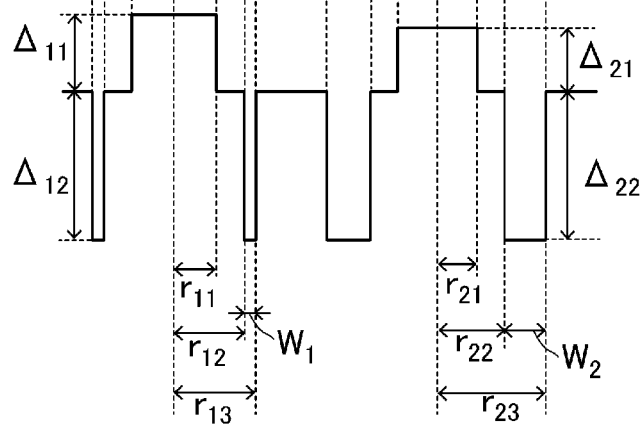


[図2]

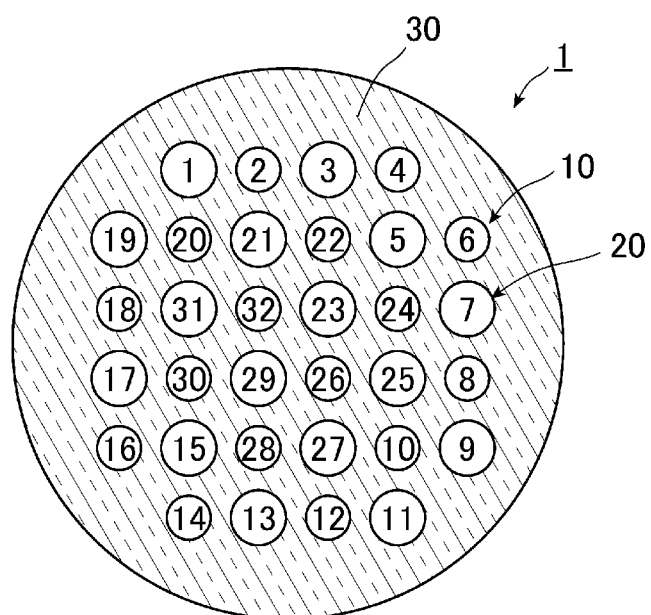
(A)



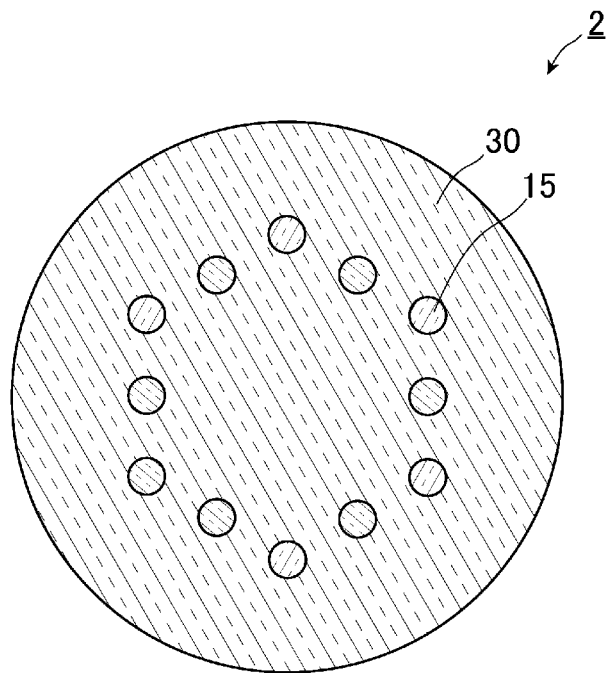
(B)



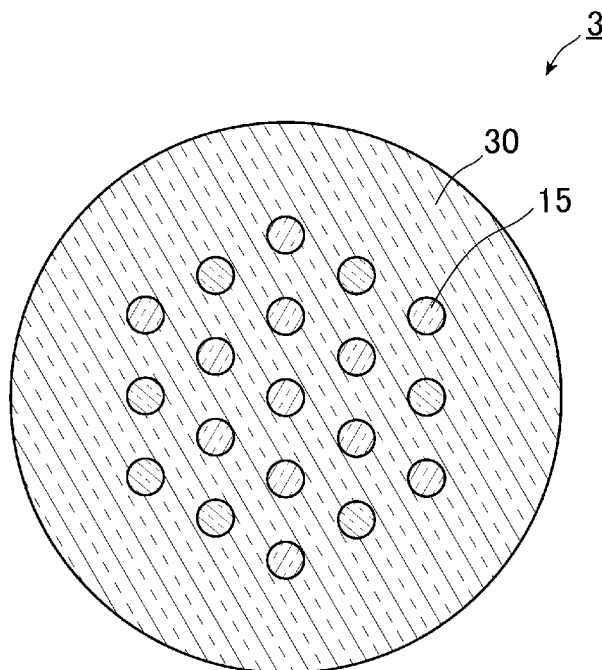
[図3]



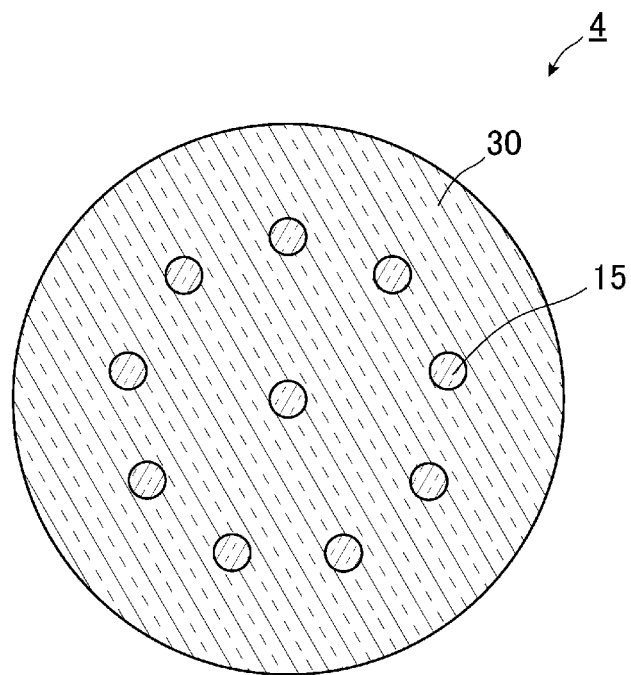
[図4]



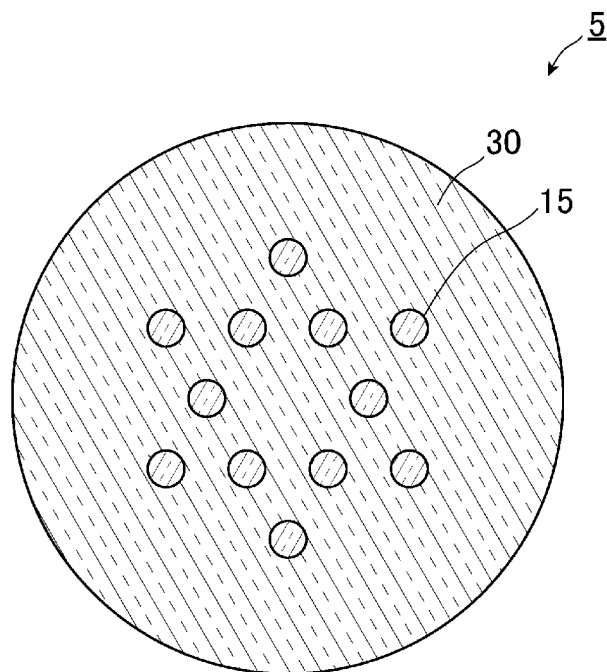
[図5]



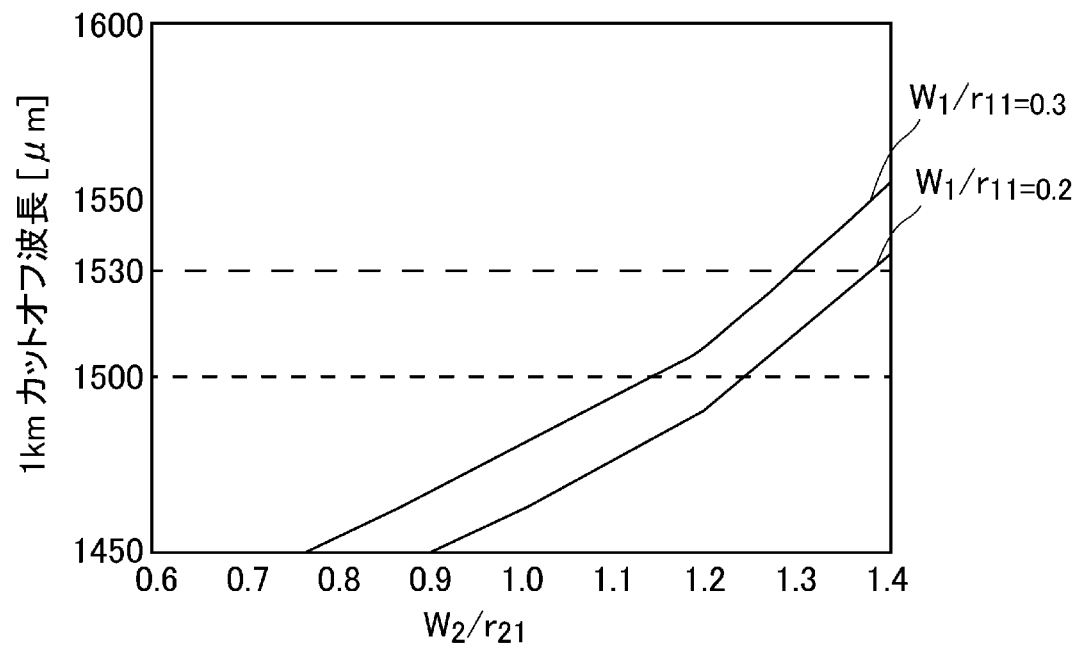
[図6]



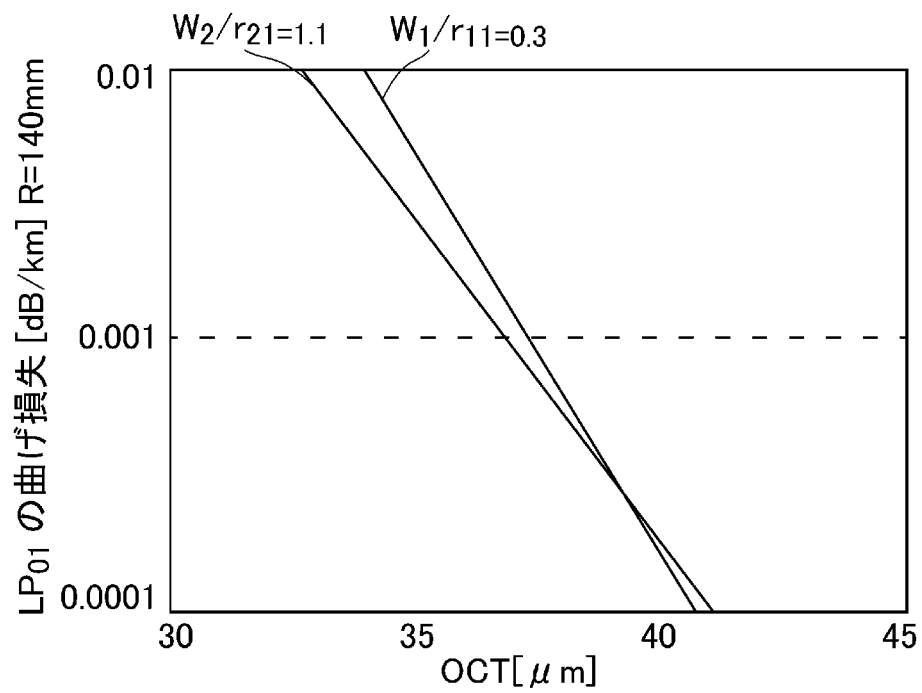
[図7]



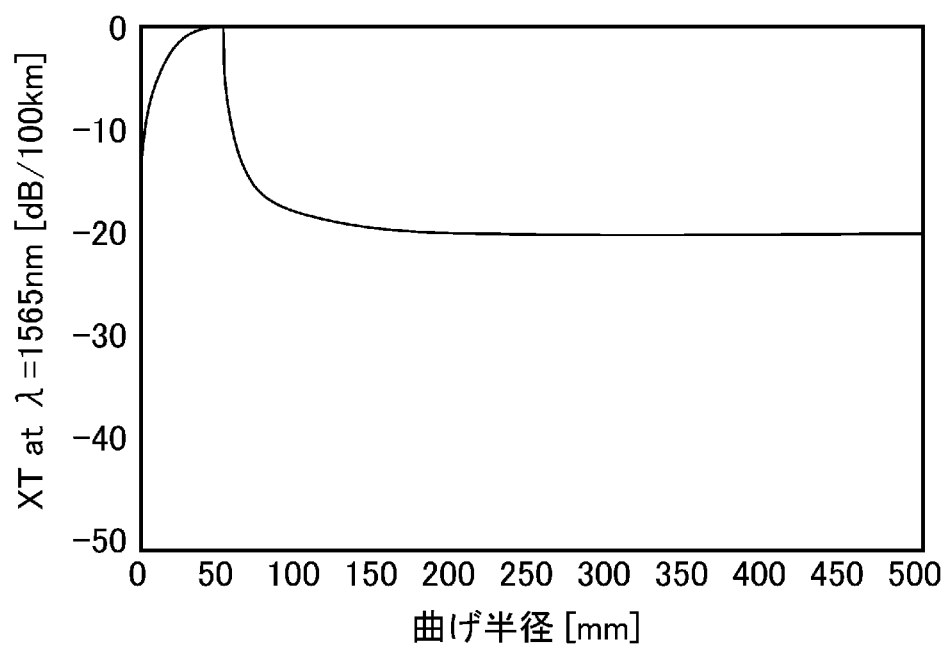
[図8]



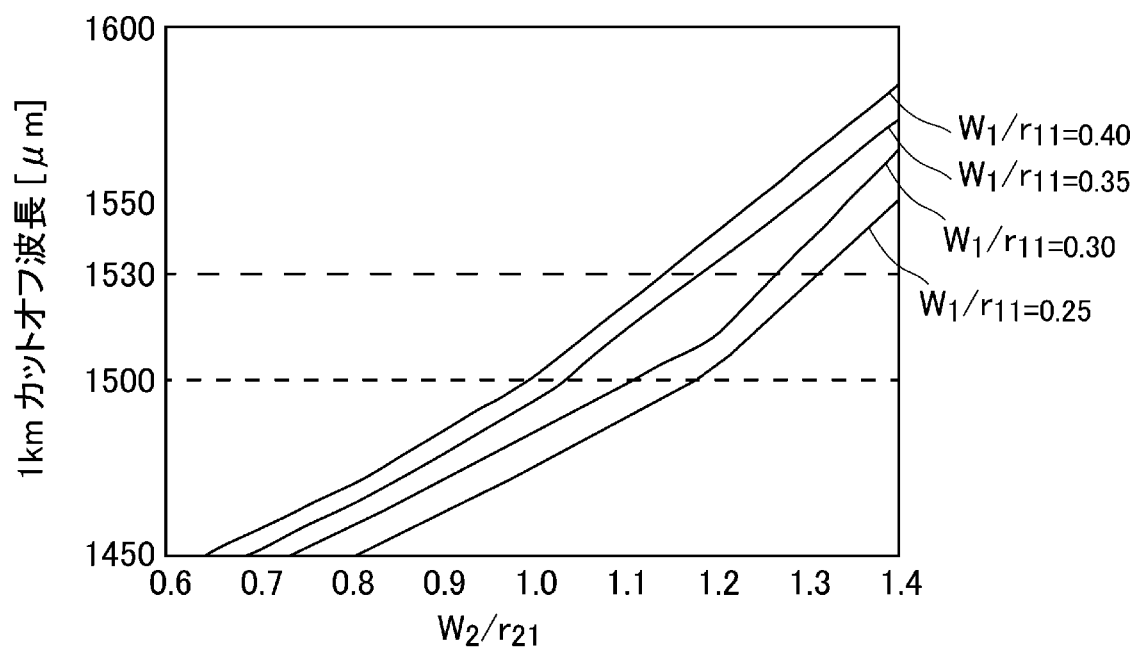
[図9]



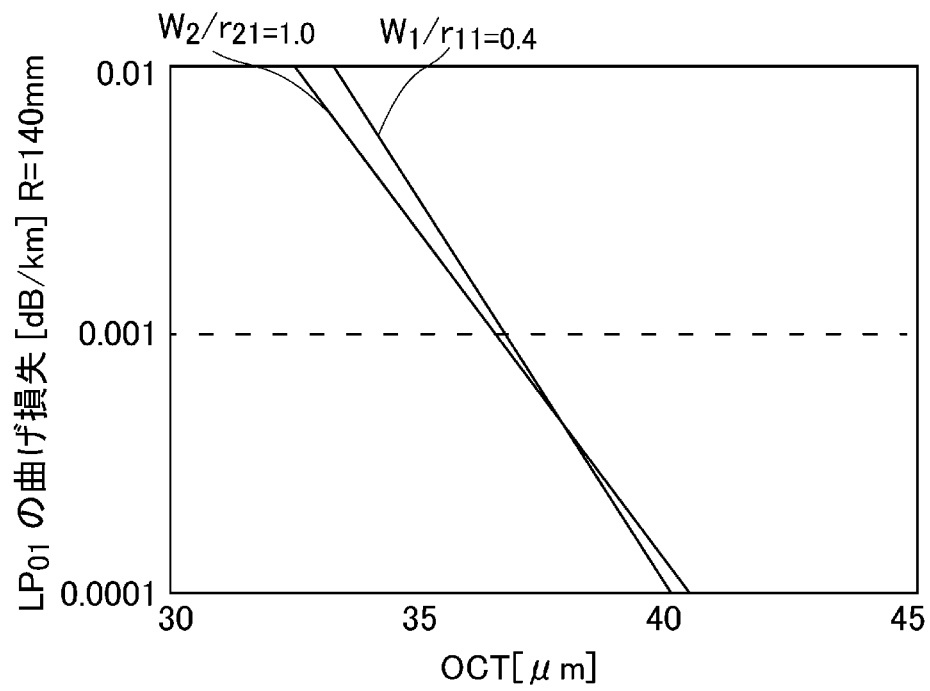
[図10]



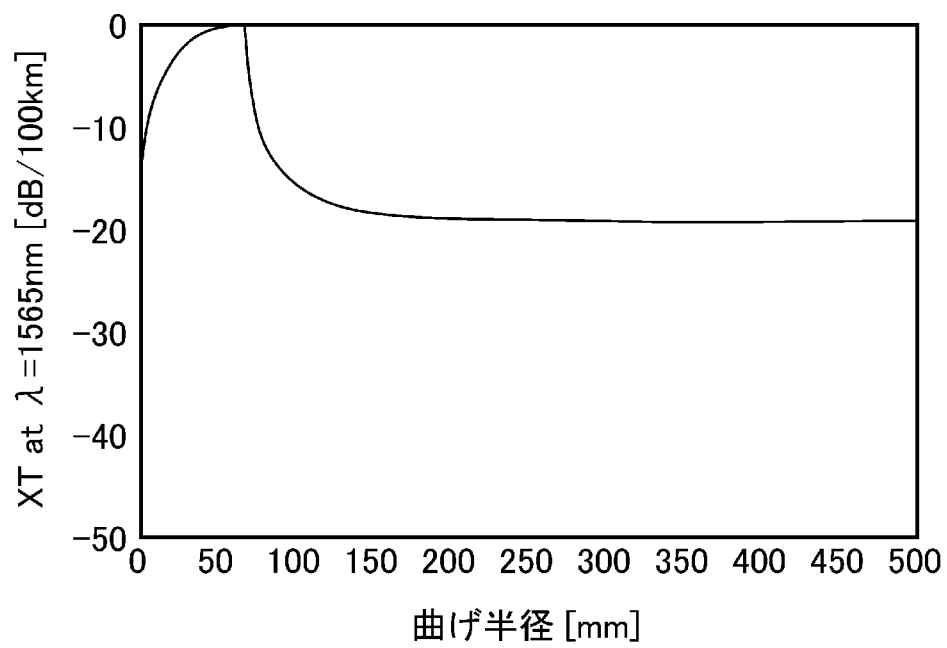
[図11]



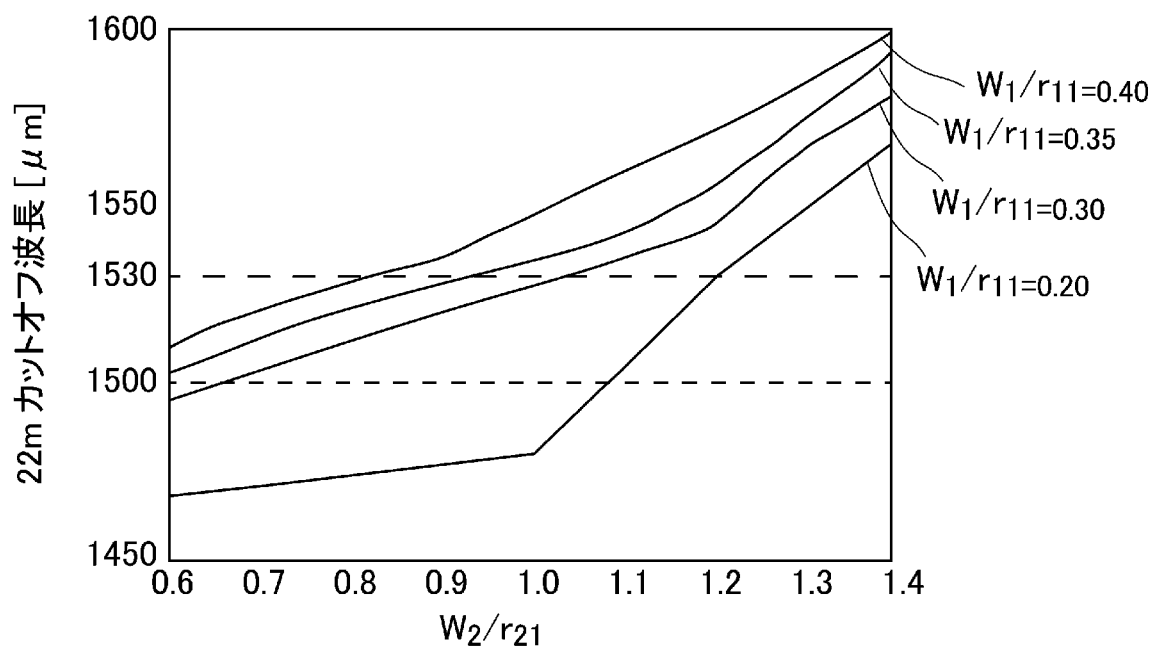
[図12]



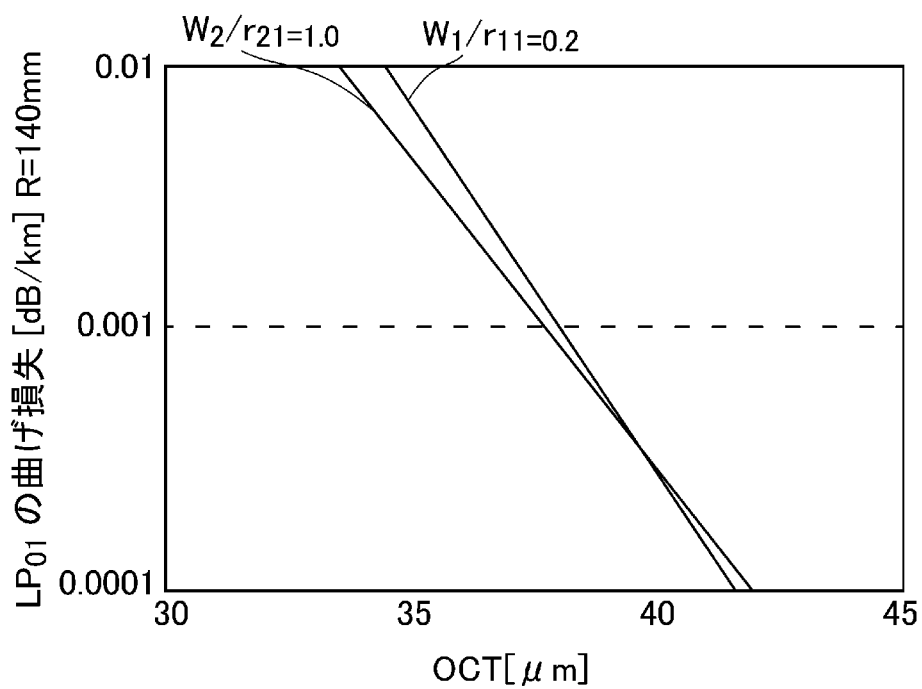
[図13]



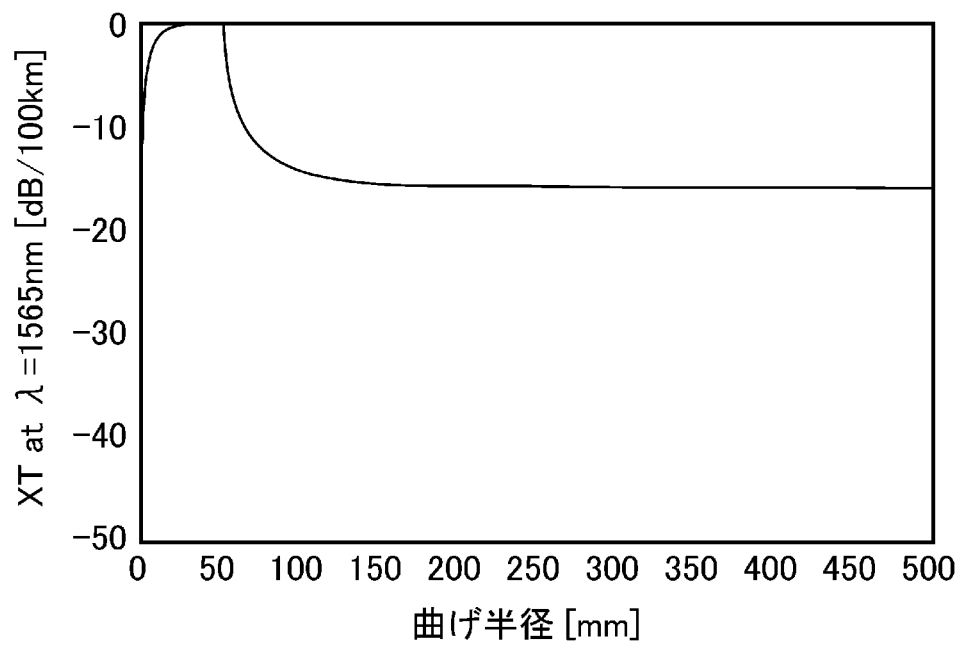
[図14]



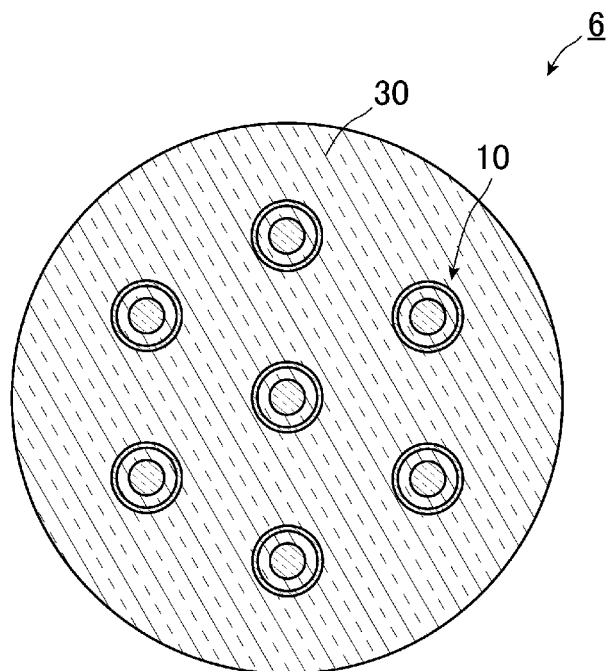
[図15]



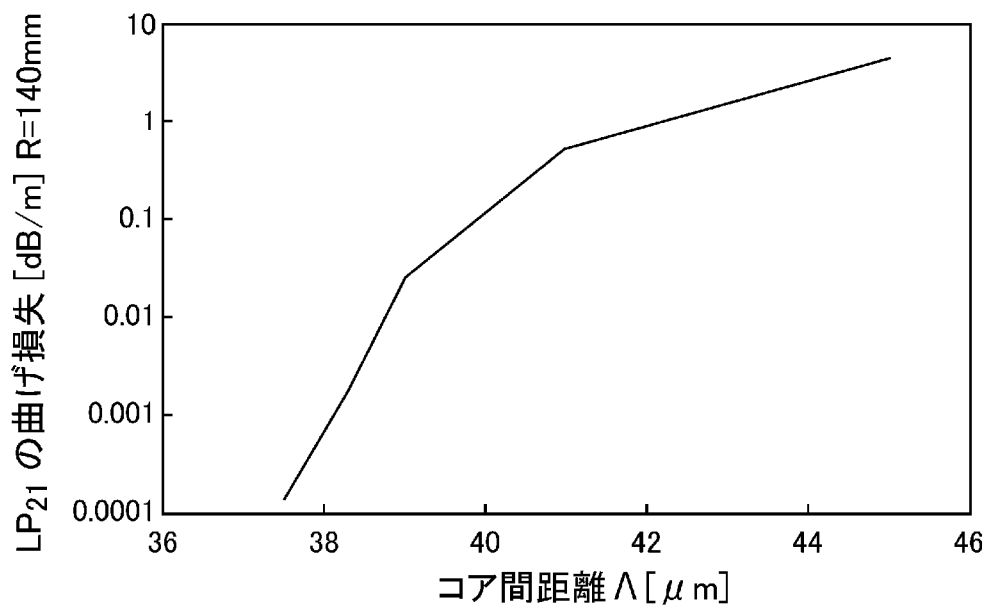
[図16]



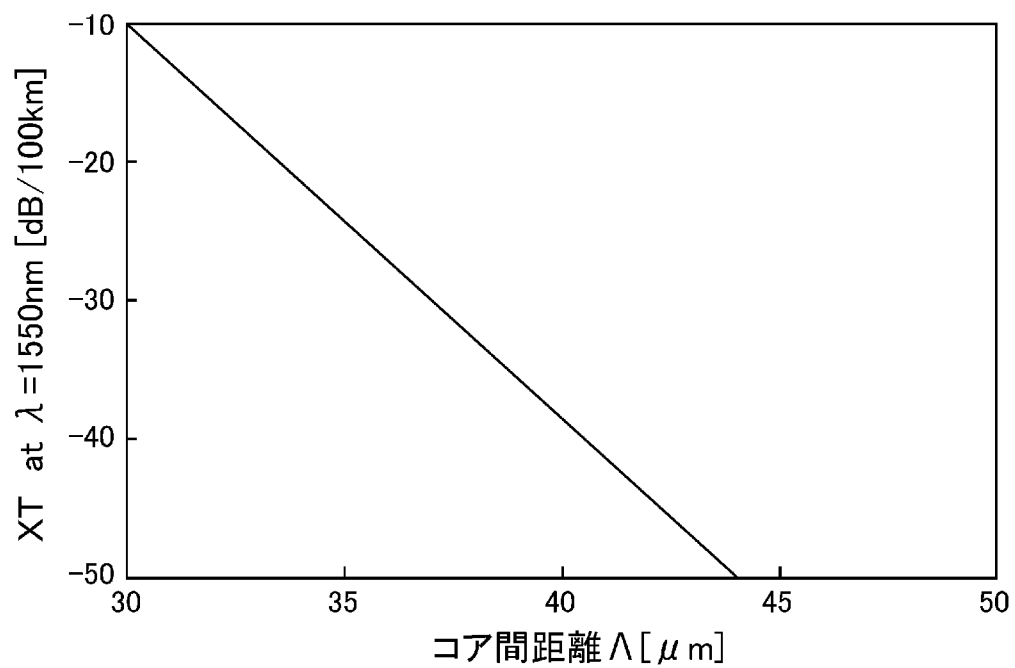
[図17]



[図18]



[図19]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/008307

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B6/02(2006.01)i, G02B6/036(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02B6/02-6/036

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CiNii, IEEE Xplore

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2014-010266 A (Fujikura Ltd.), 20 January 2014 (20.01.2014), paragraphs [0022] to [0031], [0045] to [0052]; fig. 1 to 3, 6 (Family: none)	1-8
X	WO 2015/133407 A1 (Fujikura Ltd.), 11 September 2015 (11.09.2015), paragraphs [0024] to [0033], [0040], [0046] to [0049], [0056]; fig. 1 to 3 & US 2016/0187576 A1 paragraphs [0050] to [0059], [0066], [0072] to [0075], [0082]; fig. 1 to 3 & US 9588284 B2 & EP 3029498 A1	1-8

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
08 May 2017 (08.05.17)

Date of mailing of the international search report
23 May 2017 (23.05.17)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/008307

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 2015-022086 A (Nippon Telegraph and Telephone Corp.), 02 February 2015 (02.02.2015), paragraphs [0037] to [0039]; fig. 12 to 13, 16 (Family: none)	1-4, 6-8 5
A	JP 2013-106135 A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 30 May 2013 (30.05.2013), paragraphs [0032] to [0034]; fig. 7 & JP 5842556 B2 & US 2013/0129292 A1 paragraphs [0038] to [0040]; fig. 7 & US 9244217 B2 & WO 2013/069541 A1 & EP 2793412 A1 & CN 103931120 A	1-8

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G02B6/02(2006.01)i, G02B6/036(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G02B6/02-6/036

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

CiNii, IEEE Xplore

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	JP 2014-010266 A（株式会社フジクラ）2014.01.20, 段落[0022]-[0031], [0045]-[0052], 図1-3, 6（ファミリーなし）	1-8
X	WO 2015/133407 A1（株式会社フジクラ）2015.09.11, 段落[0024]-[0033], [0040], [0046]-[0049], [0056], 図1-3 & US 2016/0187576 A1, 段落[0050]-[0059], [0066], [0072]-[0075], [0082], 図1-3 & US 9588284 B2 & EP 3029498 A1	1-8

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

08.05.2017

国際調査報告の発送日

23.05.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

野口 晃一

2 L

5708

電話番号 03-3581-1101 内線 3295

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X A	JP 2015-022086 A (日本電信電話株式会社) 2015.02.02, 段落 [0037]-[0039], 図 12-13, 16 (ファミリーなし)	1-4, 6-8 5
A	JP 2013-106135 A (住友電気工業株式会社) 2013.05.30, 段落 [0032]-[0034], 図 7 & JP 5842556 B2 & US 2013/0129292 A1, 段落 [0038]-[0040], 図 7 & US 9244217 B2 & WO 2013/069541 A1 & EP 2793412 A1 & CN 103931120 A	1-8